

# 벡터 감쇠기의 설계

정 용 채\*, 장 의 수\*\*, 김 철 동\*\*\*

\* 전북대학교 정보통신공학과, \*\* 서강대학교 전자공학과, \*\*\* 세원텔레텍

## Design of Vector Attenuator

Yong Chae Jeong\*, Ik Soo Chang\*\*, Chul Dong Kim\*\*\*

\* Dept. of Communication Eng. Chonbuk Nat'l University,

\*\* Dept. of Electronics Eng. Sogang University, \*\* Sewon Teletech

### 요 약

감쇠기와 위상 변환기로 구성된 진폭/위상 조정 회로는 위상/이득 상호 결합 현상을 일으켜서 최적 동작 점을 찾는 데에는 많은 조정 시간이 필요하다. 본 논문에서는 입력신호의 진폭과 위상을 제어하여 출력하는 벡터 감쇠기를 설계하였다. 종전의 벡터 감쇠기는 감쇠기의 위상 변화 특성을 무시하였으나, 본 논문의 벡터 감쇠기는 감쇠기의 위상 변화 특성을 보상하였다. 이 벡터 감쇠기는  $0^\circ/180^\circ$  위상 변환기, 저위상 변화 감쇠기등으로 이루어지는데,  $0^\circ/180^\circ$  위상 변환기는 중심주파수 881MHz에서  $0^\circ/179.9^\circ$  위상 변환 특성을 얻었고, 저위상 변화 감쇠기는 감쇠량이 25dB일 때 위상 변화가  $3.6^\circ$  이내, 입출력 반사 특성이  $-20$  dB이하를 얻었다. 구현된 벡터 감쇠기는 출력 신호 공간의 직교 좌표 평면을 정확히 표현할 수 있음을 확인하였다.

### 1. 서 론

오늘날 인간은 항상 통신을 하면서 영위하고 있다고 해도 과언이 아니다. 가정과 사무실의 전화나 거리의 공중전화, 그리고 휴대폰을 가지고 국내는 물론 케이블과 통신위성을 통하여 세계의 어디든지, 누구와도 쉽게 통신을 할 수 있다. 이러한 통신이 효율적으로 운용되기 위해서는 주파수 자원의 효율적인 관리가 필요하며 그중에 하나가 송신전력을 적절히 제어하는 것이다.

최근 각광을 받고 있는 이동통신의 경우 주파수 자원의 효율적인 사용을 위해 QPSK 변조 방식을 사용하게 되었고, 이 변조 방식은 기지국 송신단에 매우 높은 선형성이 유지되는 대전력 증폭기(High Power Amplifier)를 필요하게 되었다.<sup>[1]</sup> 현재 이동 통신 기지국 송신 증폭기의 경우 비선형 특성을 갖는 증폭기에 선형성을 보장해주는 선형화(Linearizer)를 부착하여 구현하는데, 이 선형화기의 주요 제어 회로

외부 바이어스 전류에 의해 접합 저항(junction resistance,  $R_j$ ) 값이 달라지므로써 감쇠기의 동작을 하게 된다. 그러나 PIN 다이오드의 경우  $R_j$  이외에 다른 기생 소자 성분 때문에 신호 레벨 감쇠 동작시에 위상 변화도 동반하는 것이 일반적이다.

위상 변환기는 varactor 다이오드를 이용하여 구현하는 것이 일반적인데, varactor 다이오드는 인가된 역전압의 크기에 따라 다이오드의 캐패시턴스 값이 변하게 되어 이를 통해 신호의 위상을 변화시키게 된다.  $90^\circ$  하이브리드와 결합 단자 및 전달 단자에 varactor diode를 연결하여 구현하는 반사형 위상 변환기의 경우 위상 변화량이  $120^\circ$  내외인 것이 일반적이다. 따라서  $360^\circ$ 의 위상 변화량을 얻으려면 3개 이상의 반사형 위상 변환기를 연결하여야 하므로 회로의 부피가 커지며 또한 varactor 다이오드 역시 기생 소자 성분을 가지고 있어서 시차 의사 변조 등 기지국에 기생 소자 변조

에는 감쇠기(attenuator)와 위상 변환기(phase shifter)가 있다. 이 감쇠기와 위상 변환기를 이용하여 혼변조 왜곡(Intermodulation distortion) 신호 성분들을 추출하거나, 추출된 왜곡 신호 성분들의 진폭과 위상을 제어함으로써 증폭기의 최종 출력단에서 왜곡 성분들이 억제되어 출력되도록 할 수 있다.

감쇠기는 전기적으로 제어가 가능한 저항 성분을 갖고있는 PIN 다이오드나 GaAs MESFET등이 그 소자로 사용되는데 사용의 용이성을 갖는 PIN 다이오드를 사용하는 것이 일반적이다. 반사형 구조를 이용한 PIN 다이오드 감쇠기의 경우

감쇠기의 진폭과 위상 변환기의 위상 변화에 신호 대역폭과 군속도의 변화를 동반하는 것이 일반적이다.

이러한 감쇠기와 위상 변환기를 함께 사용하여 선형화기를 구현할 때, 감쇠기의 경우 부차적으로 위상 변화가, 위상 변환기의 경우는 부차적으로 삽입 손실의 변화가 발생하여 서로 영향을 미치는 위상/이득 상호 결합(phase/gain cross-coupling) 현상이 발생하여 최적 신호 진폭 감쇠량 및 위상 변화량을 얻기 위해서는 여러 번 조정해야 하는 조정 소요 시간이 필요하게 되고, 이것은 선형전력증폭기(Linear Power Amplifier:LPA)의 동작 반응 시간을 제한하는 요소로 작용한다.





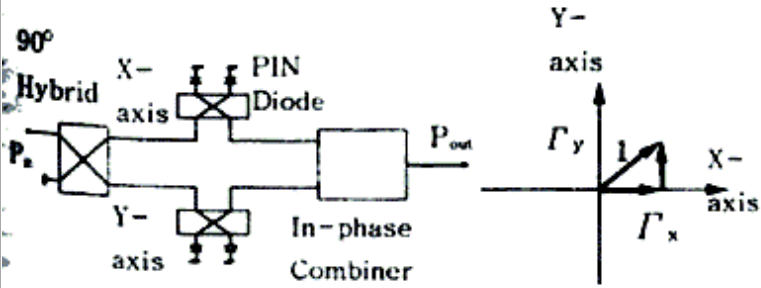
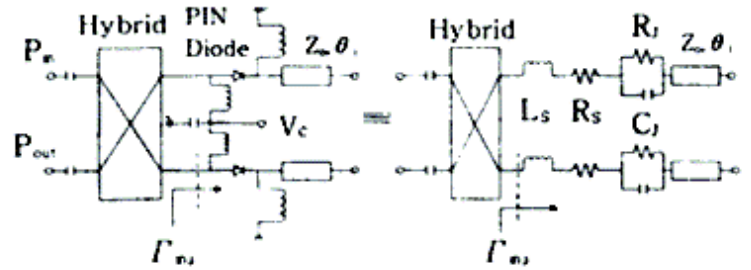


그림 1. Silverman의 벡터감쇠기 및 벡터 다이어그램

- 777 -



$i=1$  반사형  $0^\circ/180^\circ$  위상변환기

$i=2$  반사형 저위상 변환기

그림 3. 반사형  $0^\circ/180^\circ$  위상변환기 및 반사형 저위상 변환기와 그 동가회로

[ÀÏÀü](#) [ÛÀ½](#)

$$Z_{in, large} = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{\frac{1}{R_j} + j\omega C_j} + Z_{oc} \Big|_{R_j=large}$$

$$= R_s + \frac{R_j}{1 + j\omega R_j C_j} + j(\omega L_s - Z_o \cot \theta_1) \Big|_{R_j=large}$$

$$Z_{in, small} = R_s + \frac{R_j}{1 + j\omega R_j C_j} + j(\omega L_s - Z_o \cot \theta_1) \Big|_{R_j=small}$$

반사 계수는 정의로부터 다음과 같다.

$$\Gamma_{n,j} = |\Gamma_{n,j}| e^{j\phi_j} = \frac{Z_{n,j} - Z_o}{Z_{n,j} + Z_o} \Big|_{R_j=large \text{ or } small}$$

$$= \frac{R_s - Z_o + \frac{R_j}{1 + (\omega R_j C_j)^2} + j \left( \omega L_s - Z_o \cot \theta_1 - \frac{\omega R_j^2 C_j}{1 + (\omega R_j C_j)^2} \right)}{R_s + Z_o + \frac{R_j}{1 + (\omega R_j C_j)^2} + j \left( \omega L_s - Z_o \cot \theta_1 - \frac{\omega R_j^2 C_j}{1 + (\omega R_j C_j)^2} \right)} \Big|_{R_j=large \text{ or } small}$$

$$\phi_j = \tan^{-1} \left[ \frac{\omega L_s - Z_o \cot \theta_1 - \frac{\omega R_j^2 C_j}{1 + (\omega R_j C_j)^2}}{R_s - Z_o + \frac{R_j}{1 + (\omega R_j C_j)^2}} \right]$$

$$- \tan^{-1} \left[ \frac{\omega L_s - Z_o \cot \theta_1 - \frac{\omega R_j^2 C_j}{1 + (\omega R_j C_j)^2}}{R_s + Z_o + \frac{R_j}{1 + (\omega R_j C_j)^2}} \right] \Big|_{R_j=large \text{ or } small}$$

따라서 0°/180° 위상 변환의 정의에 의해 다음 식을 만족하는 전기각  $\theta_1$ 을 유도하면 된다.

$$F_1(\theta_1) = \Gamma_{in, large} - \Gamma_{in, small} \approx 0$$

이제 반사형 가변 감쇠기의 동작 원리를 살펴보면 반사형 가변 감쇠기의 회로도도 그림3의 개방 선로를 이용한 0°/180° 위상 변환기의 회로와 동일하다. 다만 0°/180° 위상 변환

$$F_2(\theta_2) = \varphi_{R_j=50} - \varphi_{R_j=Max} \approx 0$$

을 만족하는 전기각  $\theta_2$ 를 구하게 됨으로써 저위상 변화 감쇠기를 구현할 수 있게 된다.<sup>14)</sup>

### III. 실험 및 결과

벡터 감쇠기에 사용된 PIN 다이오드는 HP사의 HSMP-810이다. Deloach Method를 이용하여 다이오드의 동작 회로를 추출하였는데 추출 파라미터값은  $R_s=3.342 \Omega$ ,  $L_s=1.748 \text{ nH}$ ,  $C_j=0.2034 \text{ pF}$ 이다.<sup>15)</sup> 이 다이오드 파라미터를 이용하여 동작주파수 881MHz에서 0°/180° 위상 변환기 및 저위상 변화 감쇠기를 구현하기 위한 개방 선로의 전기각을 Mathcad를 통해 구하였는데  $\theta_1=82.2^\circ$ ,  $\theta_2=81.7^\circ$  얻을 수 있었다.

가변 감쇠기에 사용된 PIN 다이오드의 접합 저항 범위는 50~Max  $\Omega$ 으로 설정하였다. 왜냐하면 접합 저항 범위가 0~50  $\Omega$  일 때보다 50~Max  $\Omega$ 에서의 상대적인 위상 변화량이 더 작았고, 더 작은 바이어스 전류로 접합 저항의 제어가 가능하기 때문이다. 사용된 PCB는  $\epsilon_r=4.3$ ,  $h=0.8\text{mm}$ 인 Epoxy 기판을 사용하였다. 0°/180° 위상 변환기 및 저위상 변화 감쇠기에 사용된 90° 하이브리드는 RF Power사의 S03A888N1이며 동위상 결합기는 Wilkinson combiner로 구현하였다.

그림4는 측정된 0°/180° 위상 변환기의 위상 변화 특성을 보이고 있는데 869~894MHz 대역에서 상대 위상 변환 특성이  $179.9 \pm 1.4^\circ$  임을 보이고 있다. 이때 구현된 전기각  $\theta_1$ 은  $86.4^\circ$ 이다. 제작된 가변 감쇠기의 감쇠량에 따른 위상 변화량은 감쇠량 25dB에 대하여 3.6°변화 특성을 얻었다. 이때 구현된 전기각  $\theta_2$ 는  $84.4^\circ$ 이다. 그림4는 가변 감쇠기들을 이용하여 In-phase 신호 성분과 Quadrature 신호 성분 감쇠를 -1, -5, -10, -15, -20dB 시키고 Vector 감쇠기의 삽입손실 4.2dB로 정규화하였을때 Silverman의

4 AUG 1998 21:00:27

CH1 B11 LOG MAG 5 dB/ REF 0 dB 2 -28.588 dB

CH2 B21/M phase 90 °/ REF 0 ° 2 -179.74 °

dB	881.000 000 MHz
0/180 PHASE SHIFTER	
MARKER 2	1 -28.163 dB
881 MHz	2 -28.588 dB

기의 경우 반사 신호의 반사량은 같고 위상만 역위상이지만, 가변 감쇠기의 경우  $R_i=50 \Omega$  근처에서는 반사량이 최소이고 따라서 감쇠량이 최대인 반면에,  $R_i=0 \Omega$  근처 또는  $R_i$  이 매우 큰 저항값을 가질때 반사량이 최대이고 따라서 감쇠량이 최소가 된다. 저위상 변화 감쇠기의 경우  $R_i=50 \Omega$  일 때 반사 신호의 위상과  $R_i=0 \Omega$  또는  $Max \Omega$  일 때 반사 신호 위상이 같게 된다면 신호 감쇠의 특성을 얻으면서 위상 변화 특성을 최소화할 수 있게 된다.  $R_i=50 \Omega$  일 때의 감쇠기에 의한 반사 신호의 위상을  $\varphi_{R_i=50}$  이라 하고,  $R_i=Max$  일 때의 위상을  $\varphi_{R_i=Max}$  이라 하면

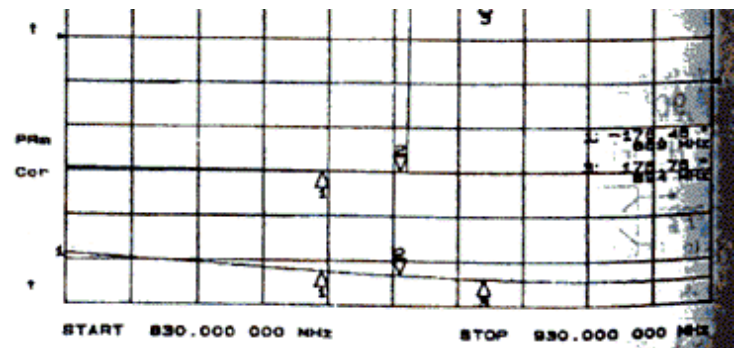


그림 4. 반사형 0°/180° 위상변환기의 측정결과

[ÀÀü](#) [ÛÀ½](#)



제시한 벡터 감쇠기의 특성이고, 그림5는 본 논문에서 제시한 벡터 감쇠기의 특성이다. 그림4와 그림5에서의 특성 계측은 원래 직교 좌표축과  $45^\circ$ 의 각도를 이루어야 하나 비교 편의성을 위해 Network Analyzer로 측정시 전기적 지연(electrical delay)을 주어 1사분면의 계측을 X축 가까이로 옮겨놓은 것으로 Silverman이 제안한 벡터 감쇠기의 특성은 출력 신호의 궤적이 직선을 이루지 못하여 정확한 직교 좌표계의 4사분면 구분 특성을 얻지 못하며 직교 좌표계의 원점이 1사분면 내에 위치하는 것을 볼 수 있다. 이러한 특성을 갖는 벡터 감쇠기를 이용할 경우 입력 신호에 대해 감쇠를 많이 하여 출력할 때 진폭과 위상이 적절히 조정된 신호를 얻는데 어려움이 따르게 된다. 반면, 본 논문에서 제시한 벡터 감쇠기의 경우 출력 신호의 궤적이 직선을 이루어 그림1과 같은 직교 좌표 사분면의 명확한 구분 특성을 얻을 수 있으며 직교 좌표계의 원점이 영점근처에서 위치하는 것을 볼 수 있다. 그림5의 특성이 완전한 직교 좌표계를 이루지 못한 이유는  $0^\circ/180^\circ$  위상 변환기의 위상 변환시 삽입 손실이 완전히 갖지 못한데서 기인한다.

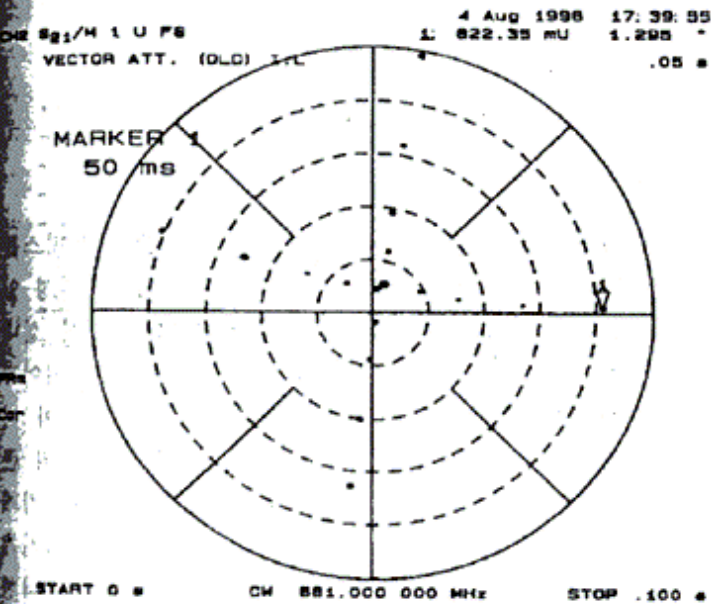
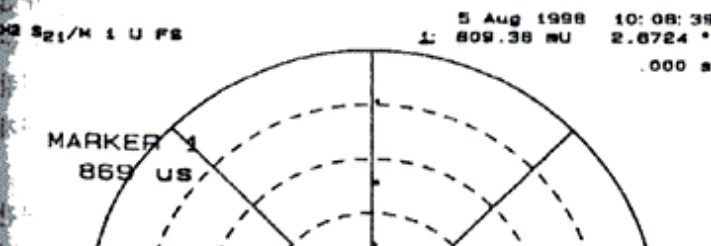


그림 5. Silverman이 제안한 벡터감쇠기의 특성



#### IV. 결론

본 논문에서는 감쇠기와 위상 변환기의 기능을 모두 포함하고 있으면서 위상/이득 상호결합(phase/gain cross-coupling) 현상이 제거된 벡터 감쇠기를 설계, 제작하였다. 벡터 감쇠기를 위해 설계된  $0^\circ/180^\circ$  위상 변환기는  $0^\circ/179.9^\circ$  위상 변환 특성을 얻었고, 감쇠기는 감쇠량이 25dB까지  $3.6^\circ$  미만으로 위상이 변하면서 반사 계수는 20dB 이상인 특성을 얻었다.

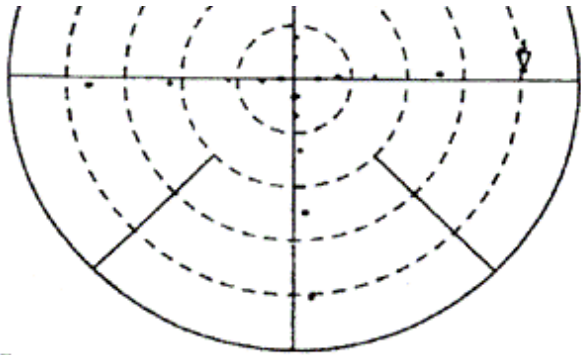
기존의 감쇠기는 바이어스 전류에 의한 접합 저항의 변화로 신호 감쇠 특성을 얻을 수 있었지만 감쇠에 따른 위상의 변화가 많았고, 위상 변환기는 바이어스 역전압에 의한 접합 캐패시터의 변화로 위상 변화 특성을 얻을 수 있었지만 위상 변화에 따른 삽입 손실의 변화가 많이 발생하였다. 이 감쇠기와 위상 변환기를 함께 선형화기에 적용하여 동작시킬 경우 상호 영향을 일으켜 최적의 감쇠기와 위상 변환기 동작점을 찾기 위해서는 여러 번의 조정이 필요하게 되었고, 빠른 선형화 동작을 제약하였다. 또한 Silverman이 제시한 벡터 감쇠기는 감쇠기의 위상 변화에 따른 영향을 고려하지 않아 출력 신호 공간의 직교 좌표 평면을 정확하게 만들기 힘들고, 따라서 임의의 진폭과 위상을 갖는 신호를 정확하게 만드는데 어려움을 갖는다.

본 논문에서 제안한 벡터 감쇠기는 신호 감쇠에 따른 위상의 변화가 최소화된 저위상 변화 감쇠기를 제작하여 두 개의 저위상 변화 감쇠기를 직교 좌표 평면축에 적용하고, 필요에 따라 축의 방향을  $0^\circ/180^\circ$  변환할 수 있게 함으로써 출력 신호 공간의 직교 좌표 평면을 정확하게 구현할 수 있었고, 임의의 진폭과 위상을 갖을 수 있는 신호들을 생성할 수 있음을 보였다. 본 벡터 감쇠기에는 저위상 변화 감쇠기를 적용함으로써 위상/이득 상호 결합 현상을 배제할 수 있었다.

본 논문에서 제시한 벡터 감쇠기가 기지국 전력 증폭기를 선형화하는 선형화기에 적용되면 기존의 선형화 회로보다 훨씬 간단한 구조를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

#### V. 참고문헌

1. Behzad Razavi, *RF Microelectronics*, Prentice Hall PTR, pp.54-97, 1998.
2. 윤 현수, 장 익수, 박 용희, 윤상원,  $360^\circ$  반사형 가변 위상 변환기 설계, 대한전자공학회 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, Vol.21, No.1, pp.237-240, 1998년
3. Lawrence Silverman, Chris Del Plato, Vector Mo-



START 0 ■ CW ■ 1.000 000 MHz STOP .100 ■

그림 6 보 노브에서 게이러 매디가서기이 표시

dulator Enhances Feedforward Cancellation, *Microwave and Rf*, pp.83-88, March. 1998.

4. 강 민수, 강 원태, 장 익수, 반사형 저위상 변화 감쇠기의 설계, 대한전자공학회의논문지, 제34권 D편 제9호, pp.1-5, 1997년
5. B. C. Deloach, "A New technique to characterize diodes and an 800-Ge cutoff frequency varactor at zero bias", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech* vol.12, pp.15-20, 1964